影响武夷山景区松墨天牛种群动态变化的因素分析

陈顺立[2]，杜瑞卿[1,*]，高宛莉[1]，吴　晖[2]，余培旺[3]，赵秋红[4]

（1. 河南南阳师范学院生命科学与技术学院，河南南阳 473061；2. 福建农林大学林学院，福州 353002；3. 武夷山林业局，福建武夷山 354300；4. 西北大学数学系，西安 720127）

摘要：为了监测武夷山景区松墨天牛 *Monochamus alternatus* Hope 的发生，防范松材松材线虫 *Bursaphelonchus xylophilus* 病的入侵，于 2005－2007 年每年 4－9 月，在武夷山景区 10 个地点进行了调查，研究了气象因素和环境因素对松墨天牛数量变化的综合影响规律及其程度，对调查结果进行了矢量递进因子分析。结果表明：环境因子和气象因子是松墨天牛羽化孔数和诱集成虫数变化的主要因素，影响松墨天牛成虫诱集数的环境因子按重要性排列依次为：郁闭度、地被物覆盖率、海拔、林龄、坡位、坡向和树高；影响羽化孔数的环境因子按重要性排列依次为：郁闭度、地被物覆盖率、树高、林龄、海拔、坡位和坡向。影响松墨天牛诱集成虫数和羽化孔数的气象因子按重要性排列依次为：月平均温度、最高与最低温差、总降雨量(mm)、气压(hpa)和平均湿度(%)。单从环境因子和气象因子的统计数据分析，环境因子的重要性次序是：坡位、郁闭度、地被物覆盖率、海拔(m)、林龄(a)、树高(m)、坡向；气象因子的重要性次序是：气压(hpa)、平均温度(℃)、最高与最低温差(℃)、总降雨量(mm)、平均湿度(%)。按月分析和按年度分析时其相对重要性基本上是一致的。结论认为，环境因子和气象因子对松墨天牛的数量变化有重要影响。

关键词：松墨天牛；种群动态；气象因子；环境因子；矢量递进因子分析；马尾松林

中图分类号：Q969.36⁺8.4　　**文献标识码**：A　　**文章编号**：0454-6296(2010)04-0427-09

Analysis of the factors influencing population dynamics of *Monochamus alternatus* Hope (Coleoptera: Cerambycidae) in Wuyishan Scenic Spot

CHEN Shun-Li[2], DU Rui-Qing[1,*], GAO Wan-Li[1], WU Hui[2], YU Pei-Wang[3], ZHAO Qiu-Hong[4]

(1. Department of Life Science and Technology, Nanyang Normal College, Nanyang, Henan 473061, China; 2. Forestry College, Fujian Agriculture and Forestry University, Fuzhou 350002, China; 3. Forestry Bureau of Wuyishan, Wuyishan, Fujian 354300, China; 4. Department of Mathematics, Northwest University, Xi'an 710127, China)

Abstract: In order to mointor the occurrence of the pine sawyer, *Monochamus alternatus* Hope, and to prevent the incursion of *Bursaphelonchus xylophilus*, the effects of meteorological factors and environmental factors on population dynamics of *M. alternatus* was investigated in 10 locations of Wuyishan Scenic Spot from April to September during 2005－2007. The results showed that meteorological factors and environmental factors composed the main factors that caused quantitative changes of trapped adults and emergence holes of *M. alternatus* by factor analysis of vectorial progression. The importance of environmental factors influencing the amounts of trapped adults and emergence holes of *M. alternatus* was in the descending order as follows: the monthly mean temperature, the temperature difference, total precipitation, air pressure and the average humidity. When the data of environmental factors and meteorological factors only were analyzed separately, the importance of environmental factors were in the descending order as follows: slope location, canopy density, coverage degree of ground, elevation, stand age, height of trees and slope aspect; the importance of meteorological factors was in the descending order as follows: atmospheric pressure, average temperature, the temperature difference, total precipitation, and average humidity. It is concluded that environmental factors and meteorological factors may influence

基金项目：福建省科技厅重大专项资助项目(2006NZ0001-2)；武夷山风景名胜区管委会资助项目；南阳师范学院重点学科科研项目

作者简介：陈顺立，男，1949 年生，教授，主要从事森林昆虫学与森林植物检疫研究，E-mail：cslfjau@126.com

[*] 通讯作者 Corresponding author，主要从事生物数学的研究，E-mail：duruiqing8@163.com

收稿日期 Received：2009-09-07；接受日期 Accepted：2009-12-20

distinctly on the population dynamics of *M. alternatus*.

Key words: *Monochamus alternatus*; population dynamics; meteorological factors; environmental factors; vectorial progression analysis on factors; *Pinus massoniana* forest

松墨天牛 *Monochamus alternatus* Hope 属鞘翅目天牛科，又名松褐天牛、松天牛，主要危害马尾松、油松、冷杉、云杉、落叶松、桧属植物等生长衰弱的树木或新伐倒木，造成寄主树势衰弱或导致树木死亡(胡长效等，2003)。该天牛还是传播松材线虫 *Bursaphelenchus xylophilus* 的媒介昆虫，松材线虫病是我国松树的毁灭性病害，控制松材线虫病的关键是防治其传播媒介松墨天牛(Fujimoto *et al*., 1989; Kishi，1995; 宁眺等，2005)。因此，有效控制松墨天牛不仅能防止其对松树造成直接危害，更重要的是可以控制松材线虫病的滋生和蔓延。对松墨天牛的研究，国内外已有不少报道(郝德君等，2005; 李水清等，2007; 杨建霞等，2009)，但是关于松墨天牛种群数量变化与气象因素、地理环境因素间的动态观测和综合因素分析，却未见报道。笔者于 2005－2007 年每年 4－9 月，在武夷山景区对松墨天牛种群数量进行了长时间的动态观测和相应的地理环境因素的调查，探讨松墨天牛发生发展的变化规律，对控制松墨天牛的发生危害，保护松林都具有重要的现实意义。

国内关于松墨天牛种群数量变化及其与环境因子的关系，已有一些报道(杨爱民，2004; 翁少容，2006; 孔维娜等，2006; 姚松等，2008)，但存在以下几个方面的不足：大多数研究主要通过单一指标与单一指标的时间序列进行相关性、回归性的计算和文字性描述，缺少综合性。事实上，环境因子是多因素的，松墨天牛种群数量变化也是表现为多方面的，环境因子对松墨天牛的影响，往往并非是单因素与单指标的关系，而是变量组指标与变量组指标的群体指标间的关系。目前，关于多变量组间关系的研究，主要有典型相关分析、回归分析法等(高惠璇，2005)。实际上，松墨天牛种群数量的变化与环境因子间的关系也并非都是线性的对应关系，用典型相关分析、回归分析法有时很难揭示它们之间的根本关系，往往并非能用线性知识或函数关系来表达出来，结果不甚理想，所以，应该考虑利用它们各自变化方向的一致性程度来揭示它们之间的关系。

基于以上几个方面的原因，笔者以武夷山景区松墨天牛为研究对象，设置 3 组观测指标，每组又采取多指标进行观测，利用本文提出的矢量递进因子分析法进行分析。矢量递进因子分析法的基本思想是：用因子分析法分析松墨天牛指标，得出 3 个主因子。对环境因子进行主成分分析，得出 3 个主成分。由于各主成分所包含的信息大小不等，所以，按信息大小比例(特征值比例)进行矢量合成，假设为合成 *D* 矢量。我们相信合成 *D* 矢量中包含对松墨天牛指标影响的主要因子成分，因此，将计算 *D* 矢量在松墨天牛指标的 3 个主因子上的投影，作为环境因子对某一松墨天牛指标的影响因素。

1 材料与方法

1.1 标准地的设立

在全面踏查的基础上，根据武夷山景区马尾松林的不同生境条件和林分状况，依据最大代表性原则，在景区内共设立了 10 块松墨天牛监测标准地(表 1)，每块监测标准地的面积约 0.1 hm^2，每块标准地随机抽取样株 30 株，并用红漆标记。同时应用福建省林业科学院改制的活虫诱捕器捕捉活成虫，在各监测标准地内各设 1 个，共设置 10 个诱捕器监测点。

1.2 调查方法

1.2.1 林间监测标准地调查方法：每块标准地调查 30 株标准株，以红漆编号，从 2005 年 4 月 20 日成虫羽化始盛期开始每月调查 1 次，至 2005 年 9 月 20 日成虫羽化末期结束；调查每标准株 2 m 以下树干新羽化孔数(调查统计过的羽化孔以红漆作记号，以避免重复计数)，连续调查 3 年。

1.2.2 诱捕器诱集成虫：用铁丝将诱捕器悬挂于两株松树之间，并使诱芯保持在离地面约1.5 m的位置上，相邻的两个诱捕器相距在 50 m 以上；引诱剂采用由福建省林业科学研究院研制的 FJ-Ma-03 型引诱剂(福建省森林病虫害防治检疫总站监制)(杨爱民，2004)，引诱剂装在开口较小的易拉罐内，内置脱脂棉，根据试验要求每 3 d 和每 7 d 添加 1 次引诱剂，每次添加引诱剂约 90～110 mL，添加前先用空瓶将废液取出。每 3 d 收集 1 次诱捕到的标本，将标本按 A～J 监测点的标号分开，带回室内鉴定，并记录收集时间、天气状况，统计雌雄数量。

1.2.3 气象因素调查：气象观测指标包括月平均温度(℃)、月平均湿度(%)、月总降雨量(mm)、月最高与最低温差(℃)、月平均气压(hpa)，于 2005－2007 年每年 4－9 月，数据来源于武夷山市气象部门。

表 1　武夷山景区松墨天牛监测标准地基本概况

Table 1　The general situation of ten field forest sites in Wuyishan Scenic Spot

监测点 Sites	地点 Location	添加引诱剂频次 (d) Frequency of adding attractants	林分组成 Forest composition	海拔(m) Elevation	林龄(a) Tree age	树高(m) Tree height	坡向 Slope direction	坡位 Slope location	郁闭度 Forest close degree	地被物覆盖率 Coverage degree
A	大红袍 Dahongpao	3	纯林 Pure	217	21	4	阳坡 Sunny	中坡 Middle	0. 45	0. 92
B	大红袍 Dahongpao	7	纯林 Pure	218	15	4. 2	阴坡 Shade	上坡 Upper	0. 48	0. 25
C	大红袍 Dahongpao	3	纯林 Pure	256	40	8. 4	阳坡 Sunny	下坡 Lower	0. 36	0. 31
D	大红袍 Dahongpao	7	纯林 Pure	333	40	7. 6	阳坡 Sunny	上坡 Upper	0. 23	0. 26
E	武夷宫 Wuyigong	7	针阔混交林 Mixed	285	40	10. 4	阳坡 Sunny	上坡 Upper	0. 25	0. 50
F	御茶园 Yuchayuan	7	纯林 Pure	209	50	5. 5	阴坡 Shade	下坡 Lower	0. 78	0. 88
G	虎啸岩 Huxiaoyan	3	纯林 Pure	251	50	5. 3	阳坡 Sunny	中坡 Middle	0. 44	0. 10
H	一线天 Yixiantian	7	纯林 Pure	237	30	7. 2	阴坡 Shade	中坡 Middle	0. 35	0. 92
I	一线天 Yixiantian	7	纯林 Pure	231	25	8. 5	阳坡 Sunny	下坡 Lower	0. 72	0. 83
J	水帘洞 Shuiliandong	7	纯林 Pure	212	15	4. 2	阳坡 Sunny	中坡 Middle	0. 45	0. 92

1.3　矢量递进因素分析法(徐克学，2001；高惠璇，2005)

1.3.1　数据的标准化处理(或中心化处理)：设 Q 为一带有单位的原变量，为了消除单位的影响，对 Q 进行标准化处理形成新的无量纲变量 M：

$M_i = \frac{Q_i - \overline{Q}}{S}$ (M_i 为 M 的分量,Q_i 为 Q 的分量,$\overline{Q}$ 为 Q 的均值,S 为 Q 的离差平方和的根)　(1)

依据公式(1)可对各变量进行无量纲标准化处理。

1.3.2　因子分析模型和主成分分析模型的建立：设有 n 个松墨天牛数量变量(为了叙述方便，结合本文，设 $n=10$)：X_1，X_2，X_3，X_4，X_5，X_6，X_7，X_8，X_9，X_{10}(为标准化处理后的变量)。对 10 个变量进行因子分析，可得到若干个主成分(一般依据方差累计贡献率≥80%时，确定主成分个数，一般不超过 3 个)，本文以 3 个为例说明：

因子分析模型：

$$
\begin{aligned}
X_1 &= b_{11} Y_1 + b_{12} Y_2 + b_{13} Y_3 \\
X_2 &= b_{21} Y_1 + b_{22} Y_2 + b_{23} Y_3 \\
X_3 &= b_{31} Y_1 + b_{32} Y_2 + b_{33} Y_3 \\
X_4 &= b_{41} Y_1 + b_{42} Y_2 + b_{43} Y_3 \\
X_5 &= b_{51} Y_1 + b_{52} Y_2 + b_{53} Y_3 \\
X_6 &= b_{61} Y_1 + b_{62} Y_2 + b_{63} Y_3 \\
X_7 &= b_{71} Y_1 + b_{72} Y_2 + b_{73} Y_3 \\
X_8 &= b_{81} Y_1 + b_{82} Y_2 + b_{83} Y_3 \\
X_9 &= b_{91} Y_1 + b_{92} Y_2 + b_{93} Y_3 \\
X_{10} &= b_{101} Y_1 + b_{102} Y_2 + b_{103} Y_3
\end{aligned} \quad (2)
$$

Y_1，Y_2，Y_3 为公共因子，方差贡献率分别为：h_1，h_2，h_3，令 $H = [h_1, h_2, h_3]$　(3)

令因子分析模型系数矩阵为：

$$
B = \begin{Bmatrix} b_{11} & b_{12} & b_{13} \\ b_{21} & b_{22} & b_{23} \\ \cdots & \cdots & \cdots \\ b_{101} & b_{102} & b_{103} \end{Bmatrix} = (b_{ij})_{10\times 3} \quad (4)
$$

设有 5 个气象因子(指标)(或 7 个环境因子指标，这里不妨以 5 个气象因子为例说明)变量 Z_1，Z_2，Z_3，Z_4，Z_5(为标准化处理后的变量)，对 5 变量进行主成分分析：

$$
\begin{aligned}
E_1 &= c_{11}Z_1 + c_{12}Z_2 + c_{13}Z_3 + c_{14}Z_4 + c_{15}Z_5 \\
E_2 &= c_{21}Z_1 + c_{22}Z_2 + c_{23}Z_3 + c_{24}Z_4 + c_{25}Z_5 \\
E_3 &= c_{31}Z_1 + c_{32}Z_2 + c_{33}Z_3 + c_{34}Z_4 + c_{35}Z_5
\end{aligned} \quad (5)
$$

E_1，E_2，E_3 为第一主成分、第二主成分、第三主成分。气象因子(或环境因子)对松墨天牛数

量变化可能有重要影响，气象因子应该构成松墨天牛数量指标因子分析中主要因子的组成部分，因此，应该寻求气象因子的主成分在松墨天牛数量指标因子分析中主要因子上的影响量。具体处理如下。

1.3.3 主成分进行矢量合成和投影分解：首先，对气象因子主成分进行矢量合成。设 λ_1，λ_2，λ_3 分别为第一主成分、第二主成分、第三主成分的特征值，依据各主成分所占的信息量，对 E_1，E_2，E_3 进行向量合成，由于第 i 主成分所含信息量为方差贡献率 d_i，$d_i = \frac{\lambda_i}{\sum_{i=1}^{5}\lambda_i}$，所以合成向量时，以第一主成分为单位，按特征值大小比例进行合成。令合成向量为 D，于是，

$$D = \frac{\lambda_2}{\lambda_1}E_2 + \frac{\lambda_3}{\lambda_1}E_3 + E_1 = a_1Z_1 + a_2Z_2 + a_3Z_3 + a_4Z_4 + a_5Z_5 \qquad (6)$$

在公式(6)通过系数 a_i 的大小，可以分析 Z_i 的相对重要性。

求主成分合成向量在松墨天牛数量指标各主要因子上的投影(分量)：

令 D 与 Y_1，Y_2，Y_3 的夹角分别为 θ_1，θ_2，θ_3，

$$\cos\theta_i = \frac{||Y_i||^2 + ||D||^2 - ||D - Y_i||^2}{2 \times ||D|| \times ||Y_i||} \quad (i = 1,2,3) \qquad \text{公式(7)}$$

那么 D 在 Y_1，Y_2，Y_3 上的分量：$D_1 = D\cos\theta_1$，$D_2 = D\cos\theta_2$，$D_3 = D\cos\theta_3$ (8)

最后，依据公式(8)，求解气象因子(或环境因子)对各松墨天牛数量指标的影响值。

将 D_1，D_2，D_3 替换 Y_1，Y_2，Y_3，将得出 X_1，X_2，X_3，X_4，X_5，X_6，X_7，X_8，X_9，X_{10} 的气象因子(或环境因子)影响预测值 X'_1，X'_2，X'_3，X'_4，X'_5，X'_6，X'_7，X'_8，X'_9，X'_{10}，然后分别对 X_i 与 X'_i 进行相关分析和检验。这样就可以分析出气象因子(或环境因子)对各松墨天牛数量指标的影响满意程度。

令 $R = [\cos\theta_1, \cos\theta_2, \cos\theta_3]$；$A = [a_1, a_2, a_3, a_4, a_5]$；那么 5 个气象因子(或 7 个环境因子)对松墨天牛数量指标的影响系数为 K：

$$K = [a_1Z_1, a_2Z_2, a_3Z_3, a_4Z_4, a_5Z_5] \times B \times [h_1\cos\theta_1, h_2\cos\theta_2, h_3\cos\theta_3] \qquad (9)$$

依据公式(9)，就可以判断出 5 个气象因子(或 7 个环境因子)对松墨天牛数量指标影响的重要性。

2 结果与分析

2.1 调查结果

从表 1 来看，10 个监测标准地的郁闭度、地被物覆盖率、海拔、林龄、坡位、坡向和树高 7 个环境指标不完全相同，所选地点间有较大的差异，都有一定的代表性。

2005 - 2007 年间对松墨天牛种群的监测结果表明，在监测标准地内均发现松墨天牛危害，说明松墨天牛在景区内分布广泛，并有扩散蔓延的特点(表 2)。气象资料见表 3，可以看出，平均温度、平均湿度、最高与最低温差和气压，在各年内呈规律性变化，3 年内相同月份间变化不大；而 3 年内相同月份内的总降雨量变化较大。

2.2 矢量递进因子分析结果

2.2.1 环境因子对松墨天牛诱集成虫数的影响：依据公式(1)~(6)，对表 1 中由 10 个调查单位(地点)和 7 个环境因子(其中定性指标坡向、坡位转化为定量指标，阳坡为 2，阴坡为 1，上坡为 3，中坡为 2，下坡为 1，由于要进行标准化处理，所以这种赋值不会影响计算)组成的矩阵运算，可求得合成主成分：

$$D = -0.4562Z_1 - 0.0986Z_2 - 0.0568Z_3 + 0.0221Z_4 - 0.6672Z_5 + 0.6010Z_6 + 0.5948Z_7$$

$A = [-0.4562, -0.0986, -0.0568, 0.0221, -0.6672, 0.6010, 0.5948]$。

由 A 可以看出，仅从环境因子自身数据的特点来看，环境因子的重要性依次是：坡位、郁闭度、地被物覆盖率、海拔(m)、林龄(a)、树高(m)、坡向。

对于表 2，由各列组成的 10 个变量，变量间的气象因素相同，所以它们间的差异，反映了环境因子的影响结果，对这 10 个变量进行因子分析，前 4 个主要因子的贡献率分别为：

$H = [0.909, 0.035, 0.023]$。

合成主成分 D 与前 3 个主要因子间的夹角余弦值分别是：$R = [-0.666, 0.074, 0.236]$。

依据公式(8)，求解环境因子对各松墨天牛数量变量的影响值。结果 10 个变量的原值与预测值经相关分析，相关系数均显著，经 t 检验均无显著差异，充分说明环境因子完全可以是 10 个松墨天牛数量变量的影响因素，因子分析模型和主成分合成模型都是正确的，且相互匹配。完全可以依据公

表 2　武夷山景区 10 个监测点松墨天牛的羽化孔数和诱集成虫数

Table 2　The number of emergence holes and trapped adults of the pine sawyer, *Monochamus alternatus* at 10 monitoring sites in Wuyishan Scenic Spot

日期 Date	大红袍 Dahongpao A	大红袍 Dahongpao B	大红袍 Dahongpao C	大红袍 Dahongpao D	武夷宫 Wuyigong E	御茶园 Yuchayuan F	虎啸岩 Huxiaoyan G	一线天 Yixiantian H	一线天 Yixiantian I	水帘洞 Shuiliandong J
2005. 4	9(0)	5(0)	12(1)	9(0)	16(1)	2(0)	1(0)	6(0)	2(0)	4(0)
2005. 5	36(4)	27(5)	43(5)	28(4)	73(9)	16(5)	19(5)	21(3)	17(2)	31(5)
2005. 6	41(5)	23(4)	56(3)	61(3)	94(7)	31(4)	45(5)	41(2)	36(3)	54(6)
2005. 7	31(4)	20(5)	43(5)	58(4)	77(6)	24(5)	33(4)	28(3)	21(4)	37(4)
2005. 8	7(2)	5(0)	8(1)	9(1)	12(3)	4(1)	3(1)	6(0)	3(1)	8(1)
2005. 9	1(0)	0(0)	2(0)	0(0)	5(0)	0(0)	1(0)	2(0)	0(0)	1(0)
2006. 4	7(1)	4(0)	9(0)	7(0)	12(1)	0(0)	1(0)	2(0)	0(0)	2(0)
2006. 5	29(5)	22(4)	31(4)	25(5)	61(8)	13(6)	12(4)	18(4)	13(2)	22(4)
2006. 6	37(4)	23(5)	39(3)	20(4)	73(7)	19(5)	21(4)	29(3)	24(3)	37(4)
2006. 7	33(6)	26(4)	41(4)	31(3)	49(7)	13(6)	18(3)	21(4)	19(3)	30(3)
2006. 8	5(1)	8(2)	10(1)	6(0)	13(2)	6(2)	9(1)	10(1)	7(0)	5(1)
2006. 9	0(0)	1(0)	2(0)	0(0)	3(0)	0(0)	2(0)	1(0)	0(0)	1(0)
2007. 4	5(1)	4(0)	7(0)	5(0)	9(2)	4(0)	1(1)	2(1)	1(0)	2(1)
2007. 5	26(5)	19(4)	28(4)	21(5)	63(10)	11(5)	10(4)	19(4)	12(3)	19(4)
2007. 6	32(4)	21(3)	29(2)	23(3)	81(7)	18(4)	21(3)	27(3)	22(2)	29(4)
2007. 7	23(4)	17(4)	24(3)	21(4)	66(9)	12(5)	17(4)	21(2)	14(3)	16(3)
2007. 8	7(1)	4(2)	5(0)	7(1)	16(3)	6(1)	5(2)	7(0)	3(1)	4(1)
2007. 9	1(0)	0(1)	0(0)	0(0)	2(1)	0(0)	1(0)	0(0)	0(0)	0(1)
总计 Total	330(47)	229(43)	389(36)	331(37)	725(83)	179(49)	220(41)	261(30)	194(27)	302(42)

括号内为诱集成虫数；仅统计 2 m 以下树干上的羽化孔。The figure in parentheses is the number of trapped adults, and only the emergence holes under 2 m of height in the trunks were counted.

表 3　2005 – 2007 年 4 – 9 月武夷山景区气象因子的基本情况

Table 3　Basic situations of meteorological factors between April and September during 2005 – 2007 in Wuyishan Scenic Spot

日期 Date	平均温度(℃) Average temperature	平均湿度(%) Average humidity	总降雨量(mm) Total precipitation	最高与最低温差(℃) Temperature difference	气压(hpa) Atmospheric pressure
2005. 4	19	76	129	22. 5	967
2005. 5	21	93	441	19	962
2005. 6	25	86	513	16	958
2005. 7	28	78	107	15	960
2005. 8	28	75	162	14	962
2005. 9	27	73	40	16	959
2006. 4	17	85	258	22	964
2006. 5	21	87	386	16	964
2006. 6	24	90	514	17	960
2006. 7	29	82	177	15	957
2006. 8	27	82	158	14	960
2006. 9	23	81	111	21	965
2007. 4	15	80	98	23	970
2007. 5	23	81	130	20	962
2007. 6	24	92	287	15	959
2007. 7	29	78	25	14	959
2007. 8	26	87	299	15	958
2007. 9	24	83	89	14	962

式(9)计算 7 个环境因子对松墨天牛数量指标的影响系数 K：

K = [0.2725， － 0.1589，0.1139， 0.1532，0.1585，－0.3591，－0.3553]。

由 K 可以看出，影响松墨天牛诱集成虫数最重要的系数是郁闭度和地被物覆盖率，但它们是负向影响，起抑制作用；其次是海拔(m)，起正向促进作用；再次是林龄、坡位和坡向，林龄是负向的抑制作用，坡位和坡向是正向的促进作用；树高对松墨天牛诱集成虫数的影响最小。

2.2.2 气象因子对松墨天牛诱集成虫数的影响：依据公式(1)~(6)，对表 3 中由 18 个调查时间和 5 个气象因子组成的矩阵运算，可求得合成主成分：

$$D = -0.5330Z_1 - 0.3684Z_2 - 0.5290Z_3 + 0.5306Z_4 + 0.7117Z_5$$

A = [－0.5330， －0.3684， －0.5290，0.5306，0.7117]。

由 A 可以看出，仅从气象因子自身数据的特点来看，气象因子的重要性依次是：气压(hpa)、平均温度(℃)、最高与最低温差(℃)、总降雨量(mm)、平均湿度(%)。

对于表 2，由各行组成的 18 个变量，变量间的环境因素相同，所以它们间的差异，反映了气象因子的影响结果，对这 18 个变量进行因子分析，前 3 个主要因子的贡献率分别为：

H = [0.546，0.151，0.105]。

合成主成分 D 与前 3 个主要因子间的夹角余弦值分别是：R = [0.423，0.252，－0.158]。

依据公式(8)，求解气象因子对各松墨天牛数量变量的影响值。结果 18 个变量的原值与预测值经相关分析，相关系数均显著，经 t 检验均无显著差异，充分说明气象因子完全可以是 18 个松墨天牛数量变量的影响因素，因子分析模型和主成分合成模型都是正确的，且相互匹配。完全可以依据公式(9)计算 5 个气象因子对松墨天牛数量指标的影响系数 K：

K = [0.2796， －0.0930， －0.1335，0.1739，－0.1345]。

由 K 可以看出，影响松墨天牛诱集成虫数最重要的系数是月平均温度，是正向促进作用，因为温度的增加会加快松墨天牛的生长速度；其次是最高与最低温差；再其次是总降雨量(mm)、气压(hpa)和平均湿度(%)，它们都是负向影响，起抑制作用。

2.2.3 环境因子对松墨天牛羽化孔数的影响：方法同 2.2.1，结果对这 10 个变量进行因子分析，前 3 个主要因子的贡献率分别为：

H = [0.947，0.041，0.006]。

合成主成分 D 与前 3 个主要因子间的夹角余弦值分别是：R = [－0.449，0.000， －0.624]。

依据公式(8)，求解环境因子对各松墨天牛数量变量的影响值。结果 10 个变量的原值与预测值经相关分析，相关系数均显著，经 t 检验均无显著差异，充分说明环境因子完全可以是 10 个松墨天牛数量变量的影响因素，因子分析模型和主成分合成模型都是正确的，且相互匹配。完全可以依据公式(9)计算 7 个环境因子对松墨天牛羽化孔数指标的影响系数 K：

K = [0.1057，－0.1423，0.2744，0.1095，0.1062，－0.3257，－0.2851]。

由 K 可以看出，对松墨天牛羽化孔数的影响系数最重要的是郁闭度，但它是负向影响，是抑制作用；其次是地被物覆盖率，但它也是负向影响，是抑制作用；再其次是树高和林龄，树高是正向促进作用，林龄是负向影响；最后是海拔(m)、坡位和坡向，它们的影响最小，是正向促进作用。

考虑到松墨天牛在武夷山一年只发生 1 代，单纯以月份序列的动态数据进行因子分析还不够全面，因此，可以把 4－9 月松墨天牛羽化孔数的总量作为年度总量，进行年度序列的动态分析。

松墨天牛羽化孔数年度总量的 3 个变量的 3 个主要因子的贡献率分别为：

H = [0.957，0.0272，0.0158]。

影响系数 K：K = [0.3725， －0.0889，0.5483，0.4022，0.3962， －0.5521， －0.0953]。

由 K 可以看出，影响松墨天牛羽化孔数年度总量最重要的系数是郁闭度和树高，但郁闭度是负向影响；其次是坡向、坡位、海拔，是正向的促进作用，最小的是林龄和地被物覆盖率，它们是负向影响，但影响非常小。与按月序列分析比较，大多数指标的相对重要性和影响方向(促进或抑制)是一致的，重要的指标基本上是郁闭度、树高，坡向、坡位、海拔和林龄，在按月分析和按年度分析时其相对重要性基本上是稳定的。地被物覆盖率相对重要性有较大的不同。结合两种分析结果，可以得出，环境因子对松墨天牛羽化孔数的影响是持久、均衡且稳定的。

2.2.4　气象因子对松墨天牛羽化孔数的影响：方法同 2.2.2，结果对对这 18 个变量进行因子分析，前 3 个主要因子的贡献率分别为：

$H = [0.813, 0.082, 0.049]$。

合成主成分 D 与前 3 个主要因子间的夹角余弦值分别是：$R = [-0.254, -0.274, -0.176]$。

依据公式(8)，求解气象因子对各松墨天牛数量变量的影响值。结果 18 个变量的原值与预测值经相关分析，相关系数均显著，经 t 检验均无显著差异，充分说明气象因子完全可以是 18 个松墨天牛数量变量的影响因素，因子分析模型和主成分合成模型都是正确的，且相互匹配。完全可以依据公式(9)计算 5 个气象因子对松墨天牛羽化孔数指标的影响系数 K：

$K = [0.3266, -0.0875, -0.1757, -0.1661, -0.0769]$。

由 K 可以看出，对松墨天牛羽化孔数的影响系数最重要的是月平均温度，是正向促进作用，因为温度的增加会加快松墨天牛的生长速度；其次是总降雨量(mm)和最高与最低温差和气压(hpa)，但它们都是负向影响，是抑制作用；再其次是平均湿度(%)和气压，它们都是负向作用，但作用最小。

同样考虑到松墨天牛在武夷山一年只发生 1 代，可进行年度序列的动态分析。与松墨天牛羽化孔数年度总量相对应，把气象因子各指标 4－9 月间的数据按最高月平均值、最低月平均值和年平均值分别运算，分析它们对松墨天牛羽化孔数年度总量的影响。

5 个气象因子最高月平均值对松墨天牛数量指标的影响系数 K：

$K = [0.1756, -0.2930, 0.1535, -0.2539, -0.2045]$。

由 K 可以看出，影响松墨天牛羽化孔数年度总量最重要的系数是最高月平均湿度(%)、最大月最高与最低温差和最高月平均气压(hpa)，它们都是负向影响；其次最高月平均温度和最高月总降雨量(mm)，它们都是正向促进作用。

5 个气象因子最低月平均值对松墨天牛数量指标的影响系数 K：

$K = [0.1922, 0.1920, 0.2875, 0.0019, -0.2177]$。

由 K 可以看出，影响松墨天牛羽化孔数年度总量最重要的系数是最低月总降雨量和最低月平均气压，最低月总降雨量是正向作用，最低月平均气压是负向作用；其次是最低月平均温度和最低月平均湿度，它们都是正向促进作；最小月最高与最低温差的作用非常小。

5 个气象因子年平均值对松墨天牛数量指标的影响系数 K：

$K = [0.2422, 0.2385, 0.3011, 0.2885, -0.0878]$。

由 K 可以看出，影响松墨天牛羽化孔数年度总量最重要的系数是年平均月总降雨量和年平均月最高与最低温差，它们都是正向促进作用；其次是年平均温度和年平均湿度，它们也都是正向促进作用；年平均气压的作用非常小。

2005－2007 年松墨天牛羽化孔数年度总量分别为：1 308，982 和 870 个，各年度松墨天牛羽化孔数主要集中发生在 5－7 月 3 个月。年度总降雨量(4－9 月)，2005 年为 1 392 mm，2006 年为 1 604 mm，2007 年为 928 mm。2006 年总降雨量虽然偏高，但主要集中在 4 月和 9 月，高于 2005 年和 2007 年同月，但这两个月的松墨天牛羽化孔数发生少，受降雨量影响小。结合以上的分析结果可以得出，年度总降雨量是影响松墨天牛羽化孔数年度总量最重要的指标，松墨天牛羽化孔数年度总量随年度总降雨量的减少而减少，特别是 5－7 月的影响最为重要。

无论是最高月平均温度，最低月平均温度还是年平均温度，都显示了重要的作用，而且都是正向的促进作用，可能因为温度的增加会加快松墨天牛的生长速度，这与按月动态分析的结果是一致的。

最大月最高与最低温差、年平均月最高与最低温差、最小月最高与最低温差，3 个指标的影响作用逐渐变小，最大月最高与最低温差是负向作用，年平均月最高与最低温差、最小月最高与最低温差是正向的，这表明温差变化在一定范围内对松墨天牛羽化孔数年度总量有较大影响的，而且温差变化较大不利于松墨天牛羽化孔数的发生。这与按月分析基本一致，而且更为明晰。

最高月平均湿度和最高月平均气压作用明显，它们都是负向影响，但年平均湿度和年平均气压，最低月平均湿度和最低平均气压的作用都较小。

3　结论与讨论

通过以上的运算和分析，可以得出结论：

(1)本文所选的环境因子基本上可以构成影响松墨天牛羽化孔数和诱集成虫数变化的主要因素，其结果是：对松墨天牛诱集成虫数的影响最重要的是郁闭度、地被物覆盖率，但它们是负向影响，是抑制作用；其次是海拔(m)，是正向促进作用；再次是林龄、坡位和坡向，林龄是负向促进作用，坡位和坡向是正向促进作用；树高对松墨天牛诱集成虫数的影响最小。对松墨天牛羽化孔数的影响最重要的是郁闭度，但它是负向影响，是抑制作用；其次是地被物覆盖率，但它也是负向影响，是抑制作用；再次是树高和林龄，树高是正向促进作用，林龄是负向影响；最后是海拔(m)、坡位和坡向，它们的影响最小，是正向促进作用。按年度动态分析与按月动态分析结果基本一致，表明环境因子对松墨天牛羽化孔数的影响是持久、均衡且稳定的。

(2)本文所选的气象因子基本上可以构成影响松墨天牛羽化孔数和诱集成虫数变化的主要因素，其结果是：对松墨天牛诱集成虫数的影响最重要的是月平均温度，是正向促进作用，因为温度的增加会加快松墨天牛的生长速度；其次是最高与最低温差；再次是总降雨量(mm)、气压(hpa)和平均湿度(%)，它们都是负向影响，是抑制作用。对松墨天牛羽化孔数的影响最重要的是月平均温度，是正向促进作用，因为温度的增加会加快松墨天牛的生长速度；其次是总降雨量和最高与最低温差和气压(hpa)，但它们都是负向影响，是抑制作用；再次是平均湿度(%)和气压，它们都是负向作用，但作用最小。按年度分析表明，年度总降雨量是影响松墨天牛羽化孔数年度总量最重要的指标，是正向的，特别是 5 – 7 月的影响最为重要；平均温度显示了重要的作用，而且都是正向的促进作用；其次是月最高与最低温差，温差变化在一定范围内对松墨天牛羽化孔数年度总量有较大影响的，而且温差变化较大不利于松墨天牛羽化孔数的发生；平均湿度和平均气压的作用都较小。

(3)单从环境因子和气象因子的数据来分析，环境因子的重要性依次是：坡位、郁闭度、地被物覆盖率、海拔(m)、林龄(a)、树高(m)、坡向；气象因子的重要性依次是：气压(hpa)、平均温度(℃)、最高与最低温差(℃)、总降雨量(mm)、平均湿度(%)。与结论(1)和(2)比较，发现环境因子和气象因子在对松墨天牛羽化孔数和诱集成虫数综合影响过程中，其重要性发生了变化，体现了因素综合分析的特殊作用。

本文所提出的矢量递进因子分析法，在研究两组数据间的因果关系时，采用了向量合成、向量分解和向量投影的方法，没有采用线性回归方法。从分析结果来看，基本上能正确反映研究对象之间的关系，说明本方法有一定的合理性、创新性和有效性。与一般的线性相关分析相比，其不同点是：①从原理上来说，矢量递进因子分析采用的是转化后具有抽象意义的不具有直接现实意义的两组变量(3 个因子和 3 个主成分)间进行的矢量关联性研究，不是一般意义上的直接数据的相关。②从检验性上来说，矢量递进因子分析的合理性和准确性，是依据主成分模型中主成分替代因子模型中的因子理想程度而确定，一般线性相关是依据对相关系数的检验而确定。③从分析结果的数据来看，矢量递进因子分析的影响系数是包括了 10 个地点的综合系数，一般线性相关的相关系数是按不同地点进行分析的。

矢量递进因子分析法，对昆虫生态研究有一定的借鉴意义。矢量递进因子分析法虽然能弥补线性分析不足的缺点，但在主成分分析、因子分析时，易造成信息的损失，转化的变量、系数的直接意义不明确，导致变量的模长统一化，使变量间失去了绝对差值大小的意义，所以有待进一步研究。

参 考 文 献 (References)

Fujimoto Y, Toda T, Nishimura K, Yamate H, Fuyuno S, 1989. Breeding project on resistance to the pine-wood nematode: an outline of the research and the achievement of the project for ten years. *Bulletin of the Forest Tree Breeding Institute*, 29(2): 17 – 20.

Gao HX, 2005. Application of Multivariate Statistic Analysis. Peking University Press, Beijing. 324 – 341. [高惠璇, 2005. 应用多元统计分析. 北京: 北京大学出版社. 324 – 341]

Hao DJ, Zhang YH, Dai HG, Wang Y, 2005. Oviposition preference of *Monochamus alternatus* Hope (Coleoptera: Cerambycidae) to host plants. *Acta Entomologica Sinica*, 48(3): 460 – 464. [郝德君, 张永慧, 戴华国, 王焱, 2005. 松墨天牛对寄主树木的产卵选择. 昆虫学报, 48(3): 460 – 464]

Hu CX, Su XL, Zhang YQ, 2003. Research advances of *Monlchamus alternatus* Hope in China. *Hebei Journal of Forestry and Orchard Research*, 18: 293 – 299. [胡长效, 苏新林, 张艳秋, 2003. 我国松墨天牛研究进展. 河北林果研究, 18: 293 – 299]

Kishi Y, 1995. The Pinewood Nematode and Japanese Pine Sawyer. Thomas Co. Ltd Press, Tokyo. 124 – 126.

Kong WN, Wang H, Li J, Zhao F, Ma RY, 2006. The effects of temperature and humidity on the longevity of *Monochamus alternatus* Hope (Coleoptera: Cerambycidae). *Journal of Shanxi Agricultural University (Natural Science Edition)*, 3: 294 – 295. [孔维娜, 王

慧，李捷，赵飞，马瑞燕，2006. 温湿度对松墨天牛越冬幼虫寿命的影响．山西农业大学学报(自然科学版)，3：294 –295]

Li SQ，Zhang ZN，2007. Effects of *Monochamus alternatus* Hope feeding and artificial damage on the contents of several chemicals in needles of *Pinus massoniana*. *Acta Entomologica Sinica*，50(2)：95 –100. [李水清，张钟宁，2007. 松墨天牛取食和人为损伤对马尾松针叶部分化学物质含量的影响．昆虫学报，50(2)：95 –100]

Ning T，Fang YL，Tang J，Sun JH，2005. Current status of monitoring strategies and control techniques for *Bursaphelenchus xylophilus* and its vector *Monochamus alternatus*. *Entomological Knowledge*，42(3)：264 –269. [宁眺，方宇凌，汤坚，孙江华，2005. 松材线虫及其传媒松墨天牛的监测和防治现状．昆虫知识，42(3)：264 –269]

Weng SR，2006. Relationships among rainfall，air temperature and occurrence area of *Monochamus alternatus*. *Journal of Fujian Forestry Science and Technology*，33(1)：94 –95，109. [翁少容，2006. 松墨天牛发生面积与气温及雨量的关系．福建林业科技，33(1)：94 –95，109]

Xu KX，2001. Biomathematics. Science Press，Beijing. 65 –69. [徐克学，2001. 生物数学．北京：科学出版社．65 –69]

Yang AM，2004. Studies on the change law of population dynamics of *Monochamus alternatus* Hope adults in forests. *Journal of Fujian Forestry Science and Technology*，31(2)：62 – 64. [杨爱民，2004. 松墨天牛成虫林间种群数量动态变动规律的初步研究．福建林业科技，31(2)：62 –64]

Yang JX，Hao DJ，Zhou SD，Dai HG，2009. Effects of plant hosts on the nutrient indices and activity of the esterase and carboxylesterase of *Monochamus alternatus*. *Scientia Silvae Sinicae*，45(1)：97 –99. [杨建霞，郝德君，周曙东，戴华国，2009. 寄主植物对松墨天牛的营养效应及对体内酯酶与羧酸酯酶活性的影响．林业科学，45(1)：97 –99]

Yao S，Wang LF，Piao CG，Shu QL，2008. Influence of forest stand factors on the amount of *Monochamus alternatus* Hope. *Journal of Anhui Agricultural University*，35(3)：411 –415. [姚松，汪来发，朴春根，束庆龙，2008. 林分因素对松墨天牛种群数量的影响．安徽农业大学学报，35(3)：411 –415]

（责任编辑：袁德成）